

Nicolae Sfetcu: Tests classiques et modernes de la relativité générale

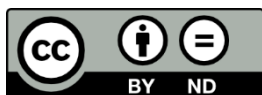
Tests classiques et modernes de la relativité générale

Nicolae Sfetcu

14.01.2020

Sfetcu, Nicolae, « Tests classiques et modernes de la relativité générale », SetThings (14 janvier 2020), URL = <https://www.setthings.com/fr/tests-classiques-et-modernes-de-la-relativite-generale/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Une traduction partielle de
Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/>

Cuprins

<u>TESTS CLASSIQUES.....</u>	<u>3</u>
LA PRÉCESSION DU PÉRIHÉLIE DE MERCURE	3
LA DÉVIATION DE LA LUMIÈRE	4
LE DÉCALAGE VERS LE ROUGE GRAVITATIONNEL	4
<u>TESTS MODERNES.....</u>	<u>6</u>
LE RETARD SHAPIRO	6
LA DILATATION GRAVITATIONNELLE DU TEMPS	7
L'EFFET LENSE-THIRRING ET L'EFFET GÉODÉSIQUE.....	8
TESTS DU PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE.....	10
TESTS DU SYSTÈME SOLAIRE	14
<u>BIBLIOGRAPHIE.....</u>	<u>16</u>

Tests classiques

Albert Einstein a proposé¹ trois tests de relativité générale, appelés plus tard les **tests classiques de relativité générale**, en 1916 :

1. Précession de l'orbite de Mercure
2. Déviation de la lumière du soleil
3. Décalage vers le rouge gravitationnel de la lumière.

Pour les tests gravitationnels, les effets indirects de la gravité sont toujours utilisés, généralement des particules qui sont influencées par la gravité. En présence de la gravité, les particules se déplacent le long de lignes géodésiques courbes. Les sources de gravité qui provoquent la courbure de l'espace-temps sont des corps matériels, en fonction de leur masse. Mais en relativité la masse se rapporte à l'énergie par la formule $E = mc^2$, et l'énergie à la quantité de mouvement, selon la relativité restreinte.

Les équations d'Einstein donnent la relation entre la géométrie spatiale et les propriétés de la matière, en utilisant la géométrie riemannienne, les propriétés géométriques étant décrites par une fonction appelée métrique. En relativité générale, la métrique de courbure de Riemann et le tenseur prennent des valeurs définies à chaque point de l'espace-temps. Le contenu de la matière définit une grandeur appelée le tenseur énergie-impulsion T . Ces quantités sont liées les unes aux autres par les équations d'Einstein, dans lesquelles le tenseur de courbure de Riemann et la métrique définissent une autre grandeur géométrique G , appelée le tenseur d'Einstein, qui décrit certains aspects du mode dans quel espace-temps est courbé. L'équation d'Einstein déclare ainsi que

$$\mathbf{G} = (8\pi G/c^4) \cdot \mathbf{T},$$

où \mathbf{G} mesure la courbure et \mathbf{T} mesure la quantité de matière. G est la constante gravitationnelle de la gravité newtonienne et c est la vitesse de la lumière en relativité restreinte. Chacune des valeurs \mathbf{G} et \mathbf{T} est déterminée par plusieurs fonctions des coordonnées espace-temps, ce qui donne en fait plus d'équations, en fait. Chaque solution de ces équations décrit une certaine géométrie de l'espace-temps.

La précession du périhélie de Mercure

Urbain Le Verrier a découvert, en 1859, que la précession orbitale de la planète Mercure ne correspond pas à la théorie : l'ellipse de son orbite tourne (précession) légèrement plus vite, la différence étant d'environ 38 (corrigée par la suite à 43) arcsecondes de rotation par siècle².

¹ Einstein, „The foundation of the general theory of relativity”, 769–822.

² U. Le Verrier, *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*, in *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (Paris : Gauthier-Villars, 1859), 379–383, <http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad>.

Plusieurs hypothèses *ad hoc* ont été proposées, telles que la poussière interplanétaire, l'oblation non observée du Soleil, un mois non détecté par Mercure, ou une nouvelle planète appelée Vulcan. Comme aucune hypothèse n'a été confirmée, il a été supposé que la loi de gravité de Newton soit incorrecte, en essayant de changer la loi, mais les nouvelles théories étaient en contradiction avec d'autres lois. Dans la relativité générale, cette précession s'explique par la gravité médiée par la courbure de l'espace, en accord avec l'observation.

La déviation de la lumière

La prédiction de la déviation de la lumière a d'abord été confirmée par l'observation de la lumière des étoiles (quasars) déviées lors de leur passage à travers le Soleil³. Dans le formalisme PPN, la déviation de la lumière est mise en évidence par le paramètre γ , qui code l'influence de la gravité sur la géométrie de l'espace. ⁴

La déviation de la lumière par un objet massif est prévue depuis 1784 par Henry Cavendish et Johann Georg von Soldner en 1801, sur la base des calculs à partir de la gravité newtonienne. Cette prédiction a été confirmée par Einstein en 1911, corrigeant la valeur de la courbure en 1915 sur la base de la relativité générale⁵. La première observation de la déviation de la lumière a été faite par Arthur Eddington lors de l'éclipse totale de soleil du 29 mai 1919, simultanément à Sobral, au Brésil et à São Tomé et Príncipe sur la côte ouest de l'Afrique. ⁶

La déviation de la lumière dans le cas relativiste général n'est observé que pour un observateur stationnaire qui voit le chemin de la lumière par rapport à un corps gravitationnel. Einstein a compris, en utilisant le PEE (principe d'équivalence d'Einstein), que la masse ou même l'énergie dans la formule d'Einstein suivrait des chemins géodésiques dans l'espace-temps, en relation avec un observateur au repos avec le corps gravitationnel. Ce résultat met en évidence l'essence du PEE, montrant que la gravité et l'accélération ne peuvent pas être différenciées l'une de l'autre, dans une petite région. Shapiro et al. ⁷ ont rapporté la courbure, par le soleil, des ondes radio émises par des sources radio extragalactiques, entre 1979 et 1999.

Le décalage vers le rouge gravitationnel

³ Daniel Kennefick și Jürgen Renn, *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift*, in *Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book.....R>.

⁴ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

⁵ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁶ Matthew Stanley, „“An Expedition to Heal the Wounds of War” The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer”, *Isis* 94, nr. 1 (1 martie 2003): 57–89, <https://doi.org/10.1086/376099>.

⁷ Shapiro et al., „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999”.

Le décalage vers le rouge gravitationnel apparaît lorsque le rayonnement électromagnétique d'une source dans un champ gravitationnel est observé à partir d'une région avec un potentiel gravitationnel plus élevé. C'est un résultat direct de l'expansion du temps gravitationnel. Dans un test pour confirmer cet effet, la réception de la lumière doit être située à un potentiel gravitationnel plus élevé. Si l'observateur a un potentiel gravitationnel inférieur à la source, il remarquera un décalage gravitationnel vers le bleu.

Einstein a prédit l'effet du principe d'équivalence en 1907, déclarant qu'il peut être mesuré dans les raies spectrales d'une étoile naine blanche qui a un très grand champ gravitationnel. La première mesure précise d'une naine blanche a été effectuée par Popper en 1954.⁸

Le système de positionnement global (GPS) doit prendre en compte le décalage vers le rouge gravitationnel dans la synchronisation⁹. Les physiciens ont analysé les données GPS pour confirmer d'autres tests¹⁰. D'autres tests de précision sont le satellite Gravity Probe A, lancé en 1976, et l'expérience Hafele-Keating qui utilisait des horloges atomiques dans des avions de navigation.¹¹

⁸ N. S. Hetherington, „Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review”, ResearchGate, 1980, 246–52, https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review.

⁹ Le GPS est testé en continu en comparant les horloges atomiques au sol et sur les satellites en orbite, pour la corrélation avec les effets relativistes, cf. NeilNeil Ashby, « Relativity in the Global Positioning System », Living Reviews in Relativity 6, no. 1 (28 janvier 2003): 1, <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.

¹⁰ Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”.

¹¹ S Schiller, „Gravitational Physics with Optical Clocks in Space”, 2015, 31.

Tests modernes

Dicke et Schiff ont établi un cadre pour tester la relativité générale¹², y compris par le biais d'expériences nulles et en utilisant la physique de l'exploration spatiale, de l'électronique et de la matière condensée, comme l'expérience Pound-Rebka et l'interférométrie laser. Les tests des lentilles gravitationnelles et le retard temporel de la lumière sont mis en évidence par le paramètre γ du formalisme PPN, égal à un pour la relativité générale et avec des valeurs différentes dans d'autres théories. La mission BepiColombo a visé à tester la théorie générale de la relativité en mesurant les paramètres gamma et bêta du formalisme PPN.¹³

Le retard Shapiro

Le retard gravitationnel (retard Shapiro), selon lequel les signaux lumineux nécessitent plus de temps pour traverser un champ gravitationnel qu'en l'absence de ce champ, a été testé avec succès¹⁴. Dans le formalisme PPN, le retard gravitationnel est mis en évidence par le paramètre γ , qui encode l'influence de la gravité sur la géométrie de l'espace.¹⁵

Irwin I. Shapiro a proposé que ce test devienne « classique », prédisant un retard relativiste dans le retour des signaux radar réfléchis sur d'autres planètes. L'utilisation des planètes Mercure et Vénus comme cibles avant et après leur éclipse par le Soleil a confirmé la théorie de la relativité générale¹⁶. Plus tard, la sonde Cassini a été utilisée pour une expérience similaire¹⁷. La mesure du paramètre gamma PPN est affectée par l'effet gravitomagnétique provoqué par le mouvement orbital du Soleil autour du centre du système solaire¹⁸. L'interférométrie de base

¹² Schiff, „On Experimental Tests of the General Theory of Relativity”, 340–343.

¹³ Brans și Dicke, „Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”, 925–935.

¹⁴ Shapiro, „Fourth Test of General Relativity”, 789–791.

¹⁵ Irwin I. Shapiro et al., „Fourth Test of General Relativity: New Radar Result”, *Physical Review Letters* 26, nr. 18 (3 mai 1971): 1132–1135, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132>.

¹⁶ Shapiro et al., 1132–1135.

¹⁷ Sergei M. Kopeikin și Edward B. Fomalont, „Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments”, *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 10 (1 octombrie 2007): 1583–1624, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6>.

¹⁸ Sergei M. Kopeikin și Edward B. Fomalont, „Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments”, *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 10 (1 octombrie 2007): 1583–1624, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6>.

très longue a permis de corriger cet effet dans le champ de mouvement de Jupiter¹⁹ et de Saturne.²⁰

La dilatation gravitationnelle du temps

La gravité influence le passage du temps. Les processus proches d'un corps massif sont plus lents²¹. Le décalage gravitationnel vers le rouge a été mesuré en laboratoire²² et à l'aide d'observations astronomiques.²³ La dilatation du temps gravitationnel dans le champ gravitationnel de la Terre a été mesurée à l'aide d'horloges atomiques²⁴, vérifiée comme effet secondaire du fonctionnement du système de positionnement global (GPS)²⁵. Les tests dans des champs gravitationnels plus forts nécessitent des pulsars binaires²⁶. Tous les résultats sont conformes à la relativité générale, mais aussi à d'autres théories où le principe d'équivalence est valable.²⁷

La dilatation gravitationnelle du temps coexiste avec l'existence d'un référentiel accéléré, à l'exception du centre d'une distribution concentrique de la matière dans laquelle il n'y a pas de référentiel accéléré, bien que l'on suppose qu'ici le temps est dilaté²⁸. Dans tous ces cas, les phénomènes physiques subissent la même dilatation du temps, conformément au principe d'équivalence. La dilatation du temps peut être mesurée pour les photons qui sont émis sur la Terre, se courbent près du Soleil, se réfléchissent sur Vénus et reviennent sur Terre le long d'un chemin similaire. On observe que la vitesse de la lumière au voisinage du Soleil est inférieure à c . Le phénomène a été mesuré expérimentalement à l'aide d'horloges atomiques dans l'avion, où des dilatations temporelles se produisent et en raison des différences d hauteurs inférieures à 1 mètre, et ont été expérimentalement vérifiées en laboratoire²⁹. D'autres modes de test sont

¹⁹ Kopeikin și Fomalont, 1583–1624.

²⁰ Ed Fomalont et al., „Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity”, *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nr. S261 (avril 2009): 291–295, <https://doi.org/10.1017/S1743921309990536>.

²¹ Misner, Thorne, și Wheeler, *Gravitation*.

²² Pound și Rebka, „Apparent Weight of Photons”, 186.

²³ Misner, Thorne, și Wheeler, *Gravitation*.

²⁴ Hans C. Ohanian și Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime* (Norton, 1994).

²⁵ Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”.

²⁶ Michael Kramer, „Millisecond Pulsars as Tools of Fundamental Physics”, în *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, ed. Savely G. Karshenboim și Ekkehard Peik, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004), 33–54, https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3.

²⁷ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*.

²⁸ Einstein a dérivé ces effets en utilisant le principe d'équivalence dès 1907, cf. Albert Einstein, »Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen, in Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 Page 432 (468 of 692).) », 1907, 411, <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/468>.

²⁹ Pound și Rebka, „Apparent Weight of Photons”, 186.

à travers l'expérience Pound-Rebka, des observations des spectres nains blancs Sirius B et des expériences avec des signaux temporels envoyés vers et depuis le sol de Mars avec le Viking 1.

L'effet Lense-Thirring et l'effet géodésique

En relativité générale, les apsides des orbites (le point sur l'orbite du corps le plus proche du centre de masse du système) auront une précession, formant une orbite différente d'une ellipse, la forme de la rose. Einstein a prédit ce mouvement. Des précessions relativistes ont été observées pour toutes les planètes qui permettent des mesures précises de la précession (Mercure, Vénus et la Terre) ³⁰, et dans les systèmes pulsar binaires où elle est plus grande de cinq ordres de grandeur.

Un système binaire qui émet des ondes gravitationnelles perd de l'énergie. Ainsi, la distance entre les deux corps orbitaux diminue, tout comme leur période orbitale. Au niveau du système solaire, l'effet est difficile à observer. Il est observable pour un pulsar presque binaire, à partir duquel des impulsions radioélectriques de fréquence très précises sont reçues, permettant des mesures de la période orbitale. Les étoiles à neutrons émettent de grandes quantités d'énergie sous forme de rayonnement gravitationnel. La première observation de cet effet est due à Hulse et Taylor, utilisant un pulsar binaire PSR1913+16 découvert en 1974. Il s'agissait de la première détection indirecte d'ondes gravitationnelles. ³¹

La relativité de la direction a plusieurs effets relativistes³², comme la précession géodésique : la direction de l'axe d'un gyroscope en chute libre dans un espace courbe va changer par rapport à la direction de la lumière reçue des étoiles lointaines³³. Pour le système Lune-Terre, cet effet a été mesuré à l'aide du laser réfléchi sur la Lune³⁴, et plus récemment à l'aide des masses d'essai à bord de la sonde Gravity Probe B. ³⁵

Près d'une masse rotative, il y a des effets gravitométriques ou Lense-Thirring. Dans le cas de trous noirs rotatifs, tout objet qui pénètre dans l'ergosphère tourne. L'effet peut être testé par son influence sur l'orientation des gyroscopes à chute libre³⁶. Des tests ont été effectués à l'aide

³⁰ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, 406–7.

³¹ Hulse și Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system”, L51–L55.

³² Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007).

³³ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 7.8.

³⁴ Kenneth Nordtvedt, „Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity”, *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 ianuarie 2003, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024>.

³⁵ C. W. F. Everitt et al., „Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity”, *Physical Review Letters* 106, nr. 22 (31 mai 2011): 221101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101>.

³⁶ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 4.7.

des satellites LAGEOS³⁷, avec la sonde Mars Global Surveyor autour de Mars³⁸, confirmant la prédiction relativiste.

Le premier effet Lense-Thirring a été dérivé en 1918, par Josef Lense et Hans Thirring et est connu sous leurs noms. Ils ont prédit que la rotation d'un objet massif déformerait la métrique espace-temps, provoquant la précession de l'orbite d'une particule d'essai à proximité. Pour le détecter, il faut examiner un objet très massif ou construire un instrument très sensible. L'effet Lense-Thirring linéaire apparaît en appliquant le principe de la RG à la quantité de mouvement. C'est très difficile à vérifier³⁹. L'augmentation de la masse statique est un autre effet, une augmentation de l'inertie d'un corps lorsque d'autres masses sont placées à proximité. Einstein déclare qu'elle dérive de la même équation de la relativité générale. C'est un petit effet, difficile à confirmer expérimentalement.

Plusieurs propositions coûteuses ont été faites⁴⁰, notamment en 1976 par Van Patten et Everitt, pour une mission spatiale spéciale visant à mesurer la précession Lense-Thirring d'une paire de véhicules spatiaux devant être placés sur des orbites polaires de la Terre avec des dispositifs sans l'effet Lense-Thirring. En 1986, Ciufolini a proposé le lancement d'un satellite géodésique passif sur une orbite identique à celle du satellite LAGEOS. Les tests ont commencé en 1996 avec les satellites LAGEOS et LAGEOS II. ⁴¹ La précision des tests est controversée. L'expérience avec Gravity Probe B n'a pas non plus atteint la précision souhaitée. ⁴²

Dans le cas des étoiles en orbite près d'un trou noir supermassif, l'effet Lense-Thirring devrait provoquer la précession du plan orbital de l'étoile autour de l'axe de rotation du trou noir, un effet qui pourrait être détecté par la suite par une surveillance astrométrique des étoiles au centre de la galaxie la Voie lactée. ⁴³

³⁷ Lorenzo Iorio, „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”, *Space Science Reviews* 148, nr. 1–4 (decembrie 2009): 363–381, <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1>.

³⁸ Lorenzo Iorio, „On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars”, *Open Physics* 8, nr. 3 (1 ianuarie 2010): 509–513, <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6>.

³⁹ Albert Einstein, „The Meaning of Relativity”, Princeton University Press, 1921, <https://press.princeton.edu/titles/484.html>.

⁴⁰ R. A. Van Patten și C. W. F. Everitt, „Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein's General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy”, *Physical Review Letters* 36, nr. 12 (22 martie 1976): 629–632, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629>.

⁴¹ Iorio, „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”, 363–381.

⁴² Everitt et al., „Gravity Probe B”.

⁴³ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 7.8.

Des jets relativistes peuvent fournir des preuves pour l'effet Lense-Thirring⁴⁴. Le modèle gravitomagnétique développé par Reva Kay Williams prédit les particules de haute énergie émises par les quasars et les noyaux galactiques actifs, l'extraction des rayons X et γ et des paires relativistes e^-e^+ , les jets collimatés autour de l'axe polaire et la formation de jets asymétriques.

Tests du principe d'équivalence

Au début du XVII^e siècle, Galileo a développé un principe similaire à celui de l'équivalence lorsqu'il a montré expérimentalement que l'accélération d'un corps due à la gravité est indépendante de sa masse. Kepler a souligné le principe d'équivalence à travers une expérience de pensée, ce qui se passerait si la lune était arrêtée en orbite et tombée sur Terre.

Le principe d'équivalence a historiquement joué un rôle important dans la loi de la gravité. Newton l'a examiné dès le premier paragraphe du *Principia*. Einstein s'est également appuyé sur ce principe en relativité générale. Le principe d'équivalence de Newton stipule que la « masse » d'un corps est proportionnelle à son « poids » (le **principe d'équivalence faible**, PEFa). Une autre définition du PEFa est que la trajectoire d'un corps en l'absence de forces est indépendante de sa structure et de sa composition internes. Un test PES simple est la comparaison de l'accélération de deux corps de composition différente dans un champ gravitationnel externe. D'autres expériences de haute précision comprennent les expériences de pendule de Newton, Bessel et Potter aux mesures de torsion classiques d'Eotvos⁴⁵, Dicke⁴⁶ et Braginsky⁴⁷. Il existe plusieurs projets pour améliorer les valeurs mesurées à l'aide de satellites.

Le **principe d'équivalence d'Einstein** (PEE) est plus fort et plus complet, déclarant que le PEFa est valide, et les résultats des expériences locales non gravitationnelles sont indépendants des vitesses des cadres de référence appropriés et du lieu et du temps où ils sont effectués. L'indépendance du cadre de référence est appelée invariance de Lorentz locale, et l'indépendance de sa structure et de sa composition internes est appelée invariance de position locale.

La relativité restreinte a bénéficié d'une série d'expériences qui ont par la suite contribué à l'acceptation de la RG :

⁴⁴ Pour un observateur distant, les jets semblent parfois se déplacer plus rapidement que la lumière, mais il s'agit d'une illusion d'optique qui ne viole pas les principes de la relativité.

⁴⁵ Roland V. Eötvös, Desiderius Pekár, și Eugen Fekete, „Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität”, *Annalen der Physik* 373 (1922): 11–66, 68, <https://doi.org/10.1002/andp.19223730903>.

⁴⁶ R. H. Dicke, *Gravitation and the universe.*, 1969, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D>.

⁴⁷ V. B. Braginsky și V. I. Panov, „Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass”, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 34, 463–466, <https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/>.

- L'expérience Michelson-Morley et les expériences équivalentes ultérieures, ⁴⁸
- Les tests Ives-Stillwell, Rossi-Hall, autres tests de dilatation du temps, ⁴⁹
- L'indépendance de la vitesse de la lumière par rapport à la vitesse de la source, en utilisant des sources stellaires binaires à rayons X et des pions à haute énergie, ⁵⁰
- L'isotropie de la vitesse de la lumière. ⁵¹

Ces dernières années, les scientifiques ont commencé à rechercher des violations apparentes de l'invariance de Lorentz résultant de certains modèles de gravité quantique. Une modalité simple, incarnée dans le formalisme c_2 , suppose que les interactions électromagnétiques subissent une légère violation de l'invariance de Lorentz en modifiant la vitesse du rayonnement électromagnétique c par rapport à la vitesse limite de la particule testant les particules⁵², en essayant de sélectionner un cadre de repos universel, possible du rayonnement de fond cosmique⁵³. Grâce aux expériences de Michelson-Morley, la vitesse de la lumière est vérifiée ; l'expérience Brillet-Hall⁵⁴ a utilisé un interféromètre laser Fabry-Perot ; dans d'autres expériences, les fréquences des oscillateurs de la cavité électromagnétique dans différentes orientations ont été comparées entre elles ou avec les horloges atomiques, selon l'orientation du laboratoire. ⁵⁵

Le principe de l'invariance de la position locale peut être testé par l'expérience de décalage vers le rouge gravitationnel. Les premières expériences de ce type ont été la série Pound-Rebka-Snider de 1960 à 1965, qui a mesuré la variation de fréquence des photons de rayonnement gamma. Le test standard de décalage vers le rouge le plus précis était l'expérience de fusée Vessot-Levine de juin 1976⁵⁶. Une expérience de décalage vers le rouge « nul » menée en 1978 a testé si le taux relatif de deux horloges différentes dépend de la position. Les expériences les plus récentes ont utilisé des techniques de refroidissement et de capture laser et de fixation

⁴⁸ A. Brillet și J. L. Hall, „Improved laser test of the isotropy of space”, *Physical Review Letters* 42 (1 februarie 1979): 42, 549–552, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549>.

⁴⁹ F. J. M. Farley et al., „The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon”, *Il Nuovo Cimento A* (1965-1970) 45, nr. 1 (1 septembrie 1966): 45, 281–286, <https://doi.org/10.1007/BF02738104>.

⁵⁰ T. Alväger et al., „Test of the second postulate of special relativity in the GeV region”, *Physics Letters* 12, nr. 3 (1 octombrie 1964): 12, 260–262, [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91095-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9).

⁵¹ null Krisher et al., „Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards”, *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nr. 2 (15 iulie 1990): 42, 731–734.

⁵² Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁵³ C. H. Lineweaver et al., „The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data”, *The Astrophysical Journal* 470 (1 octombrie 1996): 470, 38–42, <https://doi.org/10.1086/177846>.

⁵⁴ Brillet și Hall, „Improved laser test of the isotropy of space”, 42, 549–552.

⁵⁵ Paul L. Stanwix et al., „Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators”, *Physical Review Letters* 95, nr. 4 (21 iulie 2005): 040404, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404>.

⁵⁶ R. F. C. Vessot et al., „Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser”, *Physical Review Letters* 45, nr. 26 (29 decembrie 1980): 45, 2081–2084, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081>.

d'atomes pour obtenir une stabilité d'horloge extrême et ont comparé la transition hyperfin rubidium-87⁵⁷, la transition quadripôle ionique mercure-199⁵⁸, la transition atomique avec hydrogène 1S-2S⁵⁹, ou une transition optique en ytterbium-171⁶⁰, contre une transition hyperfine au niveau du sol en césium-133⁶¹.

Le principe de l'équivalence d'Einstein fait partie du noyau dur du programme de recherche d'Einstein, car l'existence du PEE implique la gravité comme un phénomène dans « l'espace-temps courbe ». Il s'avère que les seules théories de la gravité qui peuvent pleinement intégrer le PEE sont celles qui satisfont respectivement aux postulats des « théories métriques de la gravité »:⁶²

1. L'espace a une valeur symétrique.
2. Les trajectoires des corps en chute libre sont géodésiques de cette métrique.
3. Dans les cadres de référence locaux en chute libre, les lois non gravitationnelles de la physique sont celles écrites dans le langage de la relativité restreinte.

En 1960, Schiff a développé l'hypothèse selon laquelle toute théorie de gravité complète et cohérente qui incarne le PEE incarne nécessairement le PEE (la validité du PEE elle-même garantit la validité des invariants et de la position de Lorentz locaux). Dans ce cas, il s'ensuit, sur la base de l'hypothèse de conservation d'énergie, que les expériences Eotvos sont des bases empiriques directes pour le PEE. Lightman et Lee⁶³ ont fait la première tentative réussie de prouver plus formellement la conjecture de Schiff, en utilisant un cadre appelé « formalisme $TH\mu$ » qui inclut toutes les théories métriques de la gravité et de nombreuses théories non métriques, qui utilisent le taux de chute d'un corps « testé » composé de particules chargées interagissant.

⁵⁷ H. Marion et al., „A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks”, *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 avril 2003): 90, 150801–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801>.

⁵⁸ S. Bize et al., „Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg⁺ single-ion optical clock”, *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 avril 2003): 90, 150802–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802>.

⁵⁹ M. Fischer et al., „New Limits to the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements”, *Physical Review Letters* 92, nr. 23 (10 juin 2004): 92, 230802–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802>.

⁶⁰ E. Peik et al., „New limit on the present temporal variation of the fine structure constant”, *Physical Review Letters* 93, nr. 17 (18 octobre 2004): 93, 170801–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801>.

⁶¹ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁶² Will.

⁶³ A. P. Lightman și D. L. Lee, „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”, *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nr. 2 (1973): 8, 364–376, http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997.

Des preuves empiriques à l'appui du principe d'équivalence d'Einstein indiquent que les seules théories de la gravité qui espèrent être viables sont les théories métriques, ou peut-être les théories métriques en dehors des couplages non métriques très faibles ou de courte durée (comme en la théorie des cordes).⁶⁴

Il peut y avoir d'autres champs gravitationnels en plus des champs métriques, tels que les champs scalaires ou vectoriels, qui déterminent comment la matière et les champs non gravitationnels génèrent des champs gravitationnels et produisent la métrique ; mais une fois que la métrique est déterminée, elle n'agit qu'en arrière de la manière prescrite par le PEE. Ainsi, toutes les théories métriques de la gravité peuvent être divisées en deux classes fondamentales : « purement dynamique » et « précédemment géométrique »⁶⁵. Dans une « théorie métrique purement dynamique », les champs gravitationnels ont la structure et l'évolution déterminées par les équations de champ différentiel partiellement couplées. Une théorie « précédemment géométrique » contient des « éléments absolus », des champs ou des équations dont la structure et l'évolution sont données *a priori* et sont indépendantes de la structure et de l'évolution des autres domaines de la théorie. La relativité générale est une théorie purement dynamique.

Le **principe d'équivalence fort** (PEFo) stipule que : PEFa est valable pour tous les corps, et le résultat de toute expérience de test locale est indépendant de la vitesse de l'appareil et du lieu et de l'heure de l'expérience.

Comparé au PEFa, le PEFo comprend des sources gravitationnelles (planètes, étoiles) et des expériences impliquant des forces gravitationnelles (expériences Cavendish, mesures gravimétriques). Notez que PEFa inclut le PEE comme cas spécial où les forces gravitationnelles locales sont ignorées. Si PEFa est strictement valide, il ne doit y avoir qu'un seul champ gravitationnel dans l'univers, la métrique g , mais il n'y a jusqu'à présent aucune preuve rigoureuse de cette affirmation.

Le principe de l'équivalence d'Einstein peut être testé, en plus des tests PEFa, en recherchant la variation des constantes sans dimension et des rapports de masse.

Le PEFo implique que la gravité est de nature géométrique et ne contient pas de champs associés supplémentaires. Ainsi, PEFo dit qu'une mesure d'une surface d'espace plat est absolument équivalente à toute autre surface d'espace plat dans n'importe quelle autre partie de l'univers. La théorie de la relativité générale d'Einstein est la seule théorie de la gravité qui satisfait au principe fort de l'équivalence.

PEFo peut être testé en recherchant une variation de la constante gravitationnelle G de Newton, ou une variation de la masse des particules fondamentales. Celles-ci résulteraient d'écarts par rapport à la loi de la force gravitationnelle de la relativité générale, en particulier des écarts par rapport à la proportionnalité quadratique inverse, ce qui peut s'expliquer par l'existence de la

⁶⁴ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁶⁵ Will.

cinquième force. D'autres effets recherchés sont l'effet Nordtvedt, une « polarisation » des orbites du système solaire due à l'accélération gravitationnelle de l'auto-génération à un rythme différent de la matière normale, recherchée par l'expérience Lunar Laser Ranging. D'autres tests comprennent l'étude de la déviation du rayonnement provenant de sources radioélectriques éloignées du soleil mesuré avec une interférométrie de base très longue, ou la mesure du changement de fréquence des signaux vers et depuis le vaisseau spatial Cassini.

Les théories quantiques de la gravité, telles que la théorie des cordes et la gravité quantique en boucles, prévoient des violations du principe d'équivalence faible. Actuellement, les tests du principe d'équivalence faible ont un certain degré de sensibilité de sorte que la non-détection d'une violation est aussi profonde que la découverte d'une violation. Découvrir la violation du principe d'équivalence fournirait un guide important pour l'unification.⁶⁶

Un formalisme des lois non gravitationnelles de la physique en présence de la gravité qui intègre la possibilité d'un couplage non métrique (non universel) et métrique, est le formalisme TH conçu par Lightman et Lee⁶⁷. Il permet une prévision quantitative des résultats de l'expérience.

Tests du système solaire

L'environnement dynamique de l'espace-temps autour de la Terre permet de tester des théories gravitationnelles, avec des satellites géodésiques comme masses d'essai. Les satellites LAGEOS, lancés à des fins géodésiques et géodynamiques, et pour des études physiques fondamentales, en sont un exemple. Les satellites LAGEOS sont utilisés comme cible pour les impulsions laser envoyées par les stations au sol pour calculer la distance instantanée (technique « Satellite Laser Ranging » (SLR)). La détermination de l'orbite des satellites nécessite des modèles pour la dynamique des satellites, pour les procédures de mesure et pour les transformations des référentiels⁶⁸. Les modèles prennent en compte les perturbations géopotentielles, lunisolaires et planétaires, la pression du rayonnement solaire et les effets de l'albédo de la Terre, les effets Rubin-cam et Yarkovsky-Schach, les coordonnées des stations SLR, le chargement des océans, les paramètres d'orientation de la terre et la procédure de mesure⁶⁹. Les modèles incluent également des corrections relativistes générales dans le

⁶⁶ James Overduin et al., „The Science Case for STEP”, *Advances in Space Research* 43, nr. 10 (15 mai 2009): 1532–1537, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012>.

⁶⁷ Lightman și Lee, „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”, 8, 364–76.

⁶⁸ Friedrich W. Hehl et al., „General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects”, *Reviews of Modern Physics* 48, nr. 3 (1 iulie 1976): 393–416, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393>.

⁶⁹ Emil T. Akhmedov et al., „Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects”, ResearchGate, 2014, https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects.

formalisme paramétrique post-newtonien (PPN) ⁷⁰. Les tests effectués confirment les prédictions de la relativité générale (précession de Schwarzschild, effet Lense-Thirring) et excluent une théorie alternative (le potentiel NLRI/Yukawa).

⁷⁰ Nordtvedt și Will, „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”, 775–792.

Bibliographie

- Adams, John Couch. « On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns », 1846. <https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846>.
- Aiton, E. J. *Vortex Theory of Planetary Motions*. First Edition edition. London; New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1972.
- Aron, Jacob. « Earth's Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature ». *New Scientist*, 2013. <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.
- Ashtekar, Abhay, Luca Bombelli, et Alejandro Corichi. « Semiclassical States for Constrained Systems ». *Physical Review D*, 2005. https://www.academia.edu/587754/Semiclassical_states_for_constrained_systems.
- Audretsch, Jürgen. « Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions ». *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, n° 2 (1 septembre 1981): 322-39. <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.
- Bartlett, D. F., et Dave Van Buren. « Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon ». *Physical Review Letters* 57, n° 1 (7 juillet 1986): 21-24. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.
- Bekenstein, J., et M. Milgrom. « Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity? » *The Astrophysical Journal* 286 (novembre 1984): 7-14. <https://doi.org/10.1086/162570>.
- Bekenstein, Jacob D. « Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm ». *Physical Review D* 71, n° 6 (14 mars 2005): 069901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901>.
- Bernal, J. D. *Science in History J. D. Bernal*. 3rd edition. M.I.T Press, 1965.
- Birkhoff, George D. « Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, n° 8 (1 août 1943): 231-39. <https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231>.
- Bīrūnī, Muḥammad ibn Aḥmad. « Alberuni's India ». Text, 1910. http://www.columbia.edu/cu/lweb/digital/collections/cul/texts/ldpd_5949073_001/index.html.
- Blanchet, Luc, et Jerome Novak. « Testing MOND in the Solar System ». *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011. <http://arxiv.org/abs/1105.5815>.
- Bohm, David. *Quantum Theory*. Revised ed. edition. New York: Dover Publications, 1989.
- Bohr, N. « Über die Serienspektren der Elemente ». *Zeitschrift für Physik* 2, n° 5 (1 octobre 1920): 423-69. <https://doi.org/10.1007/BF01329978>.
- Bollert, Karl. *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung*. T. Steinkopf, 1921.
- Born, Max. *Einstein's Theory of Relativity*. Revised edition edition. New York: Dover Publications Inc., 1962.
- Brading, K. A., et T. A. Ryckman. « Hilbert's 'Foundations of Physics': Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, n° 1 (1 janvier 2008): 102-53. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002>.
- Brading, Katherine, et Harvey R. Brown. « Symmetries and Noether's Theorems ». In *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, édité par Katherine A. Brading et Elena Castellani, 89. Cambridge University Press, 2003.

- Brading, Katherine, Elena Castellani, et Nicholas Teh. « Symmetry and Symmetry Breaking ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.
- Braginsky, Vladimir B. « Experimental Gravitation (What Is Possible and What Is Interesting to Measure) ». *Classical and Quantum Gravity* 11, n° 6A (juin 1994): A1–A7. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/001>.
- Brans, C., et R. H. Dicke. « Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation ». *Physical Review* 124, n° 3 (1 novembre 1961): 925-35. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.
- Bucherer, A. H. « Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips ». *Annalen der Physik* 333 (1909): 513-36. <https://doi.org/10.1002/andp.19093330305>.
- Cassirer, Ernst. *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen*. B. Cassirer, 1921.
- Cassirer, Ernst, W. C. Swabey, et M. C. Swabey. *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*. Courier Corporation, 2003.
- Caves, Carlton Morris. « Theoretical investigations of experimental gravitation ». Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Challis, James. *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces*. University of Michigan Library, 1869.
- Chandrasekhar, Subrahmanyan. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Clarendon Press, 1998.
- Cicoli, Michele, Francisco G. Pedro, et Gianmassimo Tasinato. « Natural Quintessence in String Theory ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, n° 07 (23 juillet 2012): 044-044. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.
- Clifton, Timothy, Pedro G. Ferreira, Antonio Padilla, et Constantinos Skordis. « Modified Gravity and Cosmology ». *Physics Reports* 513, n° 1-3 (mars 2012): 1-189. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.
- Cohen, I. Bernard. « Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents ». *Philosophy of Science* 27, n° 2 (1960): 209–211.
- Cohen, I. Bernard, et George E. Smith. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge University Press, 2006.
- Collins, Harry M. *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Reprint edition. Chicago: University of Chicago Press, 1992.
- Damour, T. « The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity. » In *Three Hundred Years of Gravitation*, 128-98, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.
- De Lorenci, V. A., M. Faundez-Abans, et J. P. Pereira. « Testing the Newton second law in the regime of small accelerations ». *Astronomy & Astrophysics* 503, n° 1 (août 2009): L1-4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520>.
- DeWitt, C. *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*. Second Printing edition. Gordon & Breach, 1965.
- Disalle, Robert. « Spacetime Theory as Physical Geometry ». *Erkenntnis* 42, n° 3 (1995): 317–337.
- Drake, Stillman. *Galileo at Work: His Scientific Biography*. Courier Corporation, 2003.

- Duhem, Pierre Maurice Marie, Jules Vuillemin, et Louis de Broglie. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Traduit par Philip P. Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press, 1991.
- Edwards, Matthew R., éd. *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*. Y First edition edition. Montreal: Apeiron, 2002.
- Einstein, A. « The foundation of the general theory of relativity ». In *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164, 109-64, 1952*. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.
- Einstein, Albert. « Autobiographische Skizze ». In *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, édité par Carl Seelig, 9-17. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956. https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.
- . *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages Gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921. <https://www.springer.com/de/book/9783642499036>.
- . *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală*. Nicolae Sfetcu, 2017. <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.
- . *The Principle of Relativity*. S.I.: BN Publishing, 2008.
- . *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. 23. Aufl. 2001. Nachdruck. Berlin: Springer, 2002.
- Einstein, Albert (Author). « Motive des Forschens. », 1918. <http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148>.
- Esfeld, Michael, et Vincent Lam. « Moderate Structural Realism About Space-Time ». *Synthese* 160, n° 1 (2008): 27–46.
- Euler, Leonhard. *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt*. Junius, 1773. <https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ>.
- . *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*. Édité par Otto Fleckenstein. 1956 edition. Basileae: Birkhäuser, 1956.
- Famaey, Benoit, et Stacy McGaugh. « Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions ». *Living Reviews in Relativity* 15, n° 1 (décembre 2012): 10. <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10>.
- Faraoni, Valerio. « Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity ». *Physical Review D* 59, n° 8 (22 mars 1999): 084021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.
- Feyerabend, Paul. *Against Method*. London: New Left Books, 1975.
- Fine, Arthur. *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. University of Chicago Press, 1986.
- Fischbach, E., D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, et S. H. Aronson. « Reanalysis of the Eotvos experiment ». *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 3-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.
- Fomalont, E. B., et S. M. Kopeikin. « The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results ». *The Astrophysical Journal* 598, n° 1 (20 novembre 2003): 704-11. <https://doi.org/10.1086/378785>.
- Franklin, Allan. *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*. 1 edition. Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press, 2013.
- Franklin, Allan, et Slobodan Perovic. « Experiment in Physics ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.
- Fresnel, A. « Lettre a Francois Arago sur L'Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available -

- Gallica », 1818.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.
- Friedman, Michael. *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science*. Princeton University Press, 1983.
- . « Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap ». *Reconsidering Logical Positivism*, juillet 1999.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006>.
- Galison, Peter. « How Experiments End ». *Journal of Philosophy* 87, n° 2 (1990): 103–106.
- Gholson, Barry, et Peter Barker. « Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology ». *American Psychologist* 40, n° 7 (1985): 755-69.
<https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755>.
- Giovanelli, Marco. « The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci ». *Erkenntnis* 78, n° 6 (1 décembre 2013): 1219-57. <https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2>.
- Grant, Edward. *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996.
- Grünbaum, Adolf. *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition*. Springer Science & Business Media, 2012.
- Hacking, Ian. « Do We See Through a Microscope? » *Pacific Philosophical Quarterly* 62, n° 4 (1981): 305–322.
- . *The Social Construction of What?* Revised edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2000.
- Harman, P. M., et Peter Michael Harman. *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge University Press, 2001.
- Hawking, Stephen W., G. F. R. Ellis, P. V. Landshoff, D. R. Nelson, D. W. Sciama, et S. Weinberg. *The Large Scale Structure of Space-Time*. New Ed edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.
- Herapath, J. « On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in *Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts* 1 Pp. 273–293 », Atticus Rare Books, 1821.
<https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or>.
- Hill, G. W. « The Collected Mathematical Works of G. W. Hill ». *Nature* 75, n° 1936 (décembre 1906): 123. <https://doi.org/10.1038/075123a0>.
- Holt, Niles. « Wilhelm Ostwald's 'The Bridge' ». *British Journal for the History of Science* 10, n° 2 (1977): 146–150.
- Holton, Gerald. « Einstein, Michelson, and the "Crucial" Experiment ». *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132–197.
- Hossenfelder, Sabine, et Tobias Mistele. « The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter ». *International Journal of Modern Physics D* 27, n° 14 (octobre 2018): 1847010.
<https://doi.org/10.1142/S0218271818470107>.
- Howard, Don A. « Einstein's Philosophy of Science ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Fall 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philsience/>.
- Hulse, R. A., et J. H. Taylor. « Discovery of a pulsar in a binary system ». *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 janvier 1975): L51-53. <https://doi.org/10.1086/181708>.

- Huygens, Christiaan. *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885.
- Jain, Bhuvnesh, Vinu Vikram, et Jeremy Sakstein. « Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe ». *The Astrophysical Journal* 779, n° 1 (25 novembre 2013): 39. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.
- Janiak, Andrew. *Newton as Philosopher*. Cambridge University Press, 2010.
- Kaluza, Theodor. « Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy », 1921. <https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozh02>.
- Kaufmann, W. « Über die Konstitution des Elektrons ». *Annalen der Physik* 324 (1906): 487-553. <https://doi.org/10.1002/andp.19063240303>.
- Kiefer, Claus. « Quantum Gravity — A Short Overview ». In *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, édité par Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, et Eberhard Zeidler, 1-13. Basel: Birkhäuser Basel, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1.
- Kopeikin, Sergei M. « Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry ». *The Astrophysical Journal* 556, n° 1 (2001): L1-5. https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.
- Koyre, Alexandre. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Johns Hopkins University Press, 1957.
- Kroupa, Pavel. *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM>.
- Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 3rd edition. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996.
- Kustaanheimo, Paul Edwin, et V. S. Nuotio. *Relativistic Theories of Gravitation*. Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967.
- Lakatos, Imre. « Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes ». *Proceedings of the Aristotelian Society* 69, n° 1 (1968): 149–186.
- . *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Lam, Vincent, et Michael Esfeld. « The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity ». *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, n° 2 (2012): 243–258.
- Landau, L. D., et E. M. Lifshitz. *Fluid Mechanics: Volume 6*. 2 edition. Amsterdam u.a.: Butterworth-Heinemann, 1987.
- Laplace, Pierre-Simon Marquis De. *Exposition du système du monde*. 2^e éd. Cambridge; 2009: Cambridge University Press, 2009.
- Larmor, Joseph. *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904.
- Latour, Bruno, Steve Woolgar, et Jonas Salk. *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts, 2nd Edition*. 2nd edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1986.
- Laudan, L. *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. University of California Press, 1977.
- Lense, Josef, et Hans Thirring. « Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie ». *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918). <http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.
- Lodge, Oliver. « The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment ». *News. Nature*, 1921. <https://doi.org/10.1038/106795a0>.

- Lomonosov, Mikhail Vasil'evich. *Mikhail Vasil'evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*. First edition. edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970.
- Lorentz, Hendrik A. « Considerations on Gravitation ». In *The Genesis of General Relativity*, édité par Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, et John Stachel, 1038-52. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.
- Mandl, Franz, et Graham Shaw. *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory*. John Wiley & Sons, 2013.
- Matsubara, Keizo. « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ». *Synthese* 190, n° 3 (2013): 471–489.
- . *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research*. Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012.
- Matthews, Thomas A., et Allan R. Sandage. « Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects. » *The Astrophysical Journal* 138 (1 juillet 1963): 30. <https://doi.org/10.1086/147615>.
- Maxwell, Nicholas. *Karl Popper, Science and Enlightenment*. London: UCL Press, 2017.
- . « The Need for a Revolution in the Philosophy of Science ». *Journal for General Philosophy of Science* 33, n° 2 (1 décembre 2002): 381-408. <https://doi.org/10.1023/A:1022480009733>.
- McGaugh, Stacy S. « A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND ». *Canadian Journal of Physics* 93, n° 2 (21 avril 2014): 250-59. <https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203>.
- Meli, Domenico. « The Relativization of Centrifugal Force ». *Isis: A Journal of the History of Science* 81 (1990): 23–43.
- Mignard, François, et F. Arenou. « Determination of the ppn parameter with the hipparcos data », 1997.
- Milgrom, M. « A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis ». *The Astrophysical Journal* 270 (juillet 1983): 365. <https://doi.org/10.1086/161130>.
- Milgrom, Mordehai. « MOND laws of galactic dynamics ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, n° 3 (21 janvier 2014): 2531-41. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.
- . « Quasi-linear formulation of MOND ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, n° 2 (4 février 2010): 886-95. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x>.
- Milne, E. A. *Kinematic relativity*. Facsimile Publisher, 2015.
- Misner, Charles W., Kip S. Thorne, et John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- Narlikar, Jayant Vishnu. *Introduction to Cosmology*. Jones and Bartlett, 1983.
- Natorp, Paul. *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910.
- Newton, Isaac. *An Account of the Book Entitled commercium Epistolicum Collinii & Aliorum, de Analysi Promota*, 1715.
- . *Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. London: Printed for William Innys at the West-End of St. Paul's, 1730. <http://archive.org/details/opticksortreatis1730newt>.
- . « Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed. » The British Library, 1687. <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.
- . *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 1713. <https://www.e-rara.ch/zut/338618>.

- . « *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed. » *Science* 177, n° 4046 (1726): 340-42. <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340>.
- Nordtvedt, K. « Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites ». *Physical Review Letters* 61, n° 23 (5 décembre 1988): 2647-49. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.
- Nordtvedt, Kenneth. « Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology ». ResearchGate, 1968. https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.
- . « Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory ». *Physical Review* 169, n° 5 (25 mai 1968): 1017-25. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.
- . « The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging ». ResearchGate, 1995. https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.
- Nordtvedt, Kenneth, Jr., et Clifford M. Will. « Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity ». *The Astrophysical Journal* 177 (1 novembre 1972): 775. <https://doi.org/10.1086/151755>.
- Norton, John. *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984.
- Norton, John D. « General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute ». *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–861.
- Nugayev, R. M. « The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz ». *Philosophy of Science* 52, n° 1 (1985): 44–63.
- Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Petzoldt, Joseph, Giora Hon, et Ernst Mach. *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*. Xenomoi Verlag, 1921.
- Pickering, Andrew. « The Hunting of the Quark ». *Isis* 72, n° 2 (1981): 216–236.
- . *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*. 1 edition. Chicago: University of Chicago Press, 1995.
- Pierris, Graciela de. « Hume and Locke on Scientific Methodology: The Newtonian Legacy ». *Hume Studies* 32, n° 2 (2006): 277–329.
- Poincaré, Henri. « Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées ». Issue. Gallica, 1900. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r>.
- Poincare, Henri. *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method*. Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013.
- Pollio, Vitruvius. *De architectura*. Torino: Giulio Einaudi, 1997.
- Popper, Karl. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. 2nd edition. London ; New York: Routledge, 2002.
- Popper, Karl Raimund. *The Logic of Scientific Discovery*. Psychology Press, 2002.
- Pound, R. V., et G. A. Rebka. « Apparent Weight of Photons ». *Physical Review Letters* 4, n° 7 (1 avril 1960): 337-41. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.
- Prugovecki, Eduard. « Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory ». ResearchGate, 1992. https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.
- Quine, Willard V. « On Empirically Equivalent Systems of the World ». *Erkenntnis* 9, n° 3 (1975): 313–28.

- Reichenbach, Hans. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. 1 Plate. De Gruyter, 1928.
- . *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*. J. Springer, 1920.
- . *The Philosophy of Space and Time*. 1st edition. New York, NY: Dover Publications, 1957.
- Riemann, B. *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie*. Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876.
- Riemann, Bernhard, et Hermann Weyl. *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919. <https://www.springer.com/gp/book/9783662423165>.
- Ries, John C, Richard J Eanes, Byron D Tapley, et Glenn E Peterson. « Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission », s. d., 7.
- Ritz, Walther. « Recherches critiques sur l'électrodynamique générale ». *Annales de chimie et de physique*, 1908.
- Rogers, G. A. J. « Locke's Essay and Newton's Principia ». *Journal of the History of Ideas* 39, n° 2 (1978): 217.
- Roll, P. G., R. Krotkov, et R. H. Dicke. « The equivalence of inertial and passive gravitational mass ». *Annals of Physics* 26 (1 février 1964): 442-517. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).
- Russell, Bertrand. *Relativity: Philosophical Consequences, in Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31*. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA PRESS, 1926.
- . *The Analysis of Matter*. First Paperback Edition edition. Nottingham: Spokesman Books, 2007.
- Ryan, Fintan D. « Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments ». *Physical Review D* 52, n° 10 (15 novembre 1995): 5707-18. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.
- Ryckman, Thomas. « A Believing Rationalist ». *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014. <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014>.
- . *Einstein*. 1 edition. London ; New York: Routledge, 2011.
- . *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. 1 edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Ryckman, Thomas A. « Early Philosophical Interpretations of General Relativity ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/>.
- Sanders, A. J., A. D. Alexeev, S. W. Allison, K. A. Bronnikov, J. W. Campbell, M. R. Cates, T. A. Corcovilos, et al. « Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements ». *Measurement Science and Technology* 10, n° 6 (janvier 1999): 514–524. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.
- Sauer, Tilman. « Einstein's Unified Field Theory Program ». *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014. <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011>.
- Schiff, L. I. « On Experimental Tests of the General Theory of Relativity ». *American Journal of Physics* 28, n° 4 (1 avril 1960): 340-43. <https://doi.org/10.1119/1.1935800>.
- Schilpp, Paul Arthur, éd. *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*. 3rd edition. La Salle, Ill.: Open Court, 1998.
- Schlick, Moritz. *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*. Édité par Hans Jürgen Wendel et Fynn Ole Engler. Abteilung I: Veröffentlichte Schriften. Wien: Springer-Verlag, 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9783211327685>.
- . « Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik? » *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, n° n/a (1921): 96.

- . *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation*. Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2005.
- Sellien, Ewald. *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919.
- Sfetcu, Nicolae. *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* MultiMedia Publishing, 2018.
<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122>.
- . « Reconstructia Ratională a Științei Prin Programe de Cercetare », 2019.
<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288>.
- Shapin, Steven, et Simon Schaffer. *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*. Princeton University Press, 1989.
- Shapiro, Irwin I. « Fourth Test of General Relativity ». *Physical Review Letters* 13, n° 26 (28 décembre 1964): 789-91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.
- Shapiro, S. S., J. L. Davis, D. E. Lebach, et J. S. Gregory. « Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999 ». *Physical Review Letters* 92, n° 12 (26 mars 2004): 121101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.
- Sitter, W. de. « On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 décembre 1916): 155-84. <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.
- Smith, George. « Newton's Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ». In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, édité par Edward N. Zalta, Winter 2008. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2008.
<https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/>.
- Smith, Quentin. *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*. Édité par William Lane Craig. 1 edition. London: Routledge, 2007.
- Smith, W. B. « Radar observations of Venus, 1961 and 1959 ». *The Astronomical Journal* 68 (1 février 1963): 15. <https://doi.org/10.1086/108904>.
- Stokes, George Gabriel. *On Fresnel's Theory of the Aberration of Light*. London, 1846.
- Tipler, Paul A., et Ralph Llewellyn. *Modern Physics*. Sixth edition. New York: W. H. Freeman, 2012.
- Tong, David. *String Theory*. University of Cambridge, 2009.
<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.
- Trenkel, Christian, Steve Kemble, Neil Bevis, et Joao Magueijo. « Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder ». *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 janvier 2010.
<http://arxiv.org/abs/1001.1303>.
- Varignon, Pierre (1654-1722) Auteur du texte. *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur*, Par M. Varignon,..., 1690. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x>.
- Wallin, John F., David S. Dixon, et Gary L. Page. « Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects ». *The Astrophysical Journal* 666, n° 2 (10 septembre 2007): 1296-1302. <https://doi.org/10.1086/520528>.
- Walter, Scott. « Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910 ». In *The Genesis of General Relativity*, édité par Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, et John Stachel, 1118-78. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.
- Weyl, Hermann, Axel Hildebrand, et Dieter Schmalstieg. *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*. 7. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988.

- Wheeler, John A. « On the nature of quantum geometrodynamics ». *Annals of Physics* 2, n° 6 (1 décembre 1957): 604-14. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).
- Whitehead, Alfred North. *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science*. Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008.
- Whitrow, G. J., et G. E. Morduch. « Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests ». *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1-67. [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).
- Whittaker, Edmund Taylor. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Harper, 1960.
- Will, C. M. « Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect. » *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 janvier 1971. <https://doi.org/10.1086/150804>.
- Will, Clifford M. « Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16 ». *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 juillet 1992): L59-61. <https://doi.org/10.1086/186451>.
- . « The Confrontation between General Relativity and Experiment ». *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 2014): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.
- . *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.
- . *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*. 2 edition. New York, NY: Basic Books, 1993.
- Williams, James G., Slava G. Turyshev, et Dale H. Boggs. « Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity ». *Physical Review Letters* 93, n° 26 (29 décembre 2004): 261101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.
- Winsberg, Eric. *Science in the Age of Computer Simulation*. Chicago: University of Chicago Press, 2010.
- Yilmaz, Hüseyin. « New approach to relativity and gravitation ». *Annals of Physics* 81, n° 1 (1 novembre 1973): 179-200. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(73\)90485-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5).
- Zahar, Elie. « Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II) ». *British Journal for the Philosophy of Science* 24, n° 3 (1973): 223-262.
- Zenneck, J. « Gravitation ». In *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, édité par A. Sommerfeld, 25-67. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903. https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.